

Perancangan dan Implementasi Kontroller *Pid-Fuzzy* untuk Menjaga Stabilitas Nilai Frekuensi Tegangan Terbangkit Pada Pembangkit Listrik Kapasitas 1kva dengan Penggerak Utama Motor Bakar 4-Tak

Muhammad Syahputra, Mochammad Rameli, dan Rusdhianto Effendie

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ditto@elect-eng.its.ac.id

Abstrak— Penelitian ini membahas masalah kontrol frekuensi tegangan terbangkit pada *Generator set* dengan kondisi beban berubah. Frekuensi tegangan terbangkit berhubungan dengan kecepatan putar penggerak utama. *Generator set* yang digunakan pada penelitian ini memiliki penggerak utama mesin bensin 4-tak dengan sistem bahan bakar menggunakan karburator dan kapasitas 1KVA. Metode kontrol yang digunakan adalah PID-fuzzy. Hal ini dikarenakan PID konvensional kurang cocok untuk *plant non-linear* sehingga diperlukan mekanisme penalaan parameter PID untuk menyesuaikan dengan kondisi *plant*. Sistem Fuzzy melakukan penalaan parameter PID melalui informasi perubahan beban. Apabila terjadi perubahan beban, Fuzzy akan mengubah parameter PID. Kontroller PID-fuzzy mampu mengatasi perubahan frekuensi dengan cepat. Dari pengujian kontroler pada *plant* didapatkan rata-rata waktu kembali frekuensi ke *setpoint* 0.5 sekon. Perubahan Frekuensi rata-rata saat dilakukan pengubahan beban dengan jumlah berbeda yaitu 5.37%.

Kata Kunci—kontrol Frekuensi, *Generator set*, PID-Fuzzy

I. PENDAHULUAN

Sistem pembangkit listrik merupakan sistem dengan kompleksitas dan urgensi yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan sistem pembangkit listrik harus memenuhi kebutuhan listrik yang selalu berubah-ubah. Berbagai macam sistem pembangkit listrik memiliki prinsip yang sama dalam hal pengaturannya. Parameter yang berubah terhadap efek pembebanan adalah frekuensi tegangan terbangkit dan tegangan terbangkit.

Sistem pembangkit listrik diharapkan dapat beradaptasi dengan cepat terhadap beban yang berubah-ubah dan dengan perubahan yang cukup drastis. Hal ini dikarenakan, peralatan listrik yang membebani pembangkit listrik memiliki ambang batas tertentu pada frekuensi dan nilai tegangan terbangkit. Terdapat dua standar kedua parameter ini, yaitu frekuensi 50 Hz dan tegangan 220 volt serta frekuensi 60 Hz dan tegangan 110 volt.

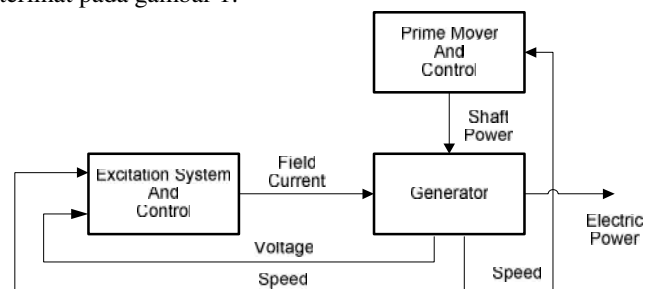
Untuk mengatasi dinamika yang cukup tinggi pada sistem pembangkit listrik, diperlukan metode kontrol yang dapat beradaptasi terhadap pembebanan tertentu. Kontroller yang cukup umum digunakan pada dunia industri adalah kontroller PID. Kontroller ini mudah untuk dirancang dan diimplementasikan. Akan tetapi, kontroler PID kurang baik untuk sistem dengan pembebanan yang berubah-ubah. Hal ini dikarenakan kontroller PID tidak dapat mempertahankan kriterianya dengan kondisi beban berubah. Oleh karena itu, diperlukan penalaan ulang pada parameter kontroller PID diantaranya K_p , τ_i , τ_d , dan N sesuai dengan kondisi beban.

Salah satu algoritma yang dapat melakukan penalaan terhadap parameter kontrol PID adalah algoritma fuzzy. Algoritma ini dipilih karena kesederhanaannya sehingga tidak terlalu memerlukan waktu yang lama dalam perhitungannya. Diharapkan Melalui mekanisme penalaan ini dihasilkan kontrol yang cukup baik terhadap sistem pembangkit listrik.

II. DESKRIPSI SISTEM

A. Sistem Pengaturan Pembangkit Listrik[1]

Pembangkit listrik berfungsi untuk memberikan daya listrik kepada pengguna sesuai kebutuhan. Oleh karena itu dibutuhkan sistem pengaturan pembangkit listrik seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 1. Skema Sistem Pengaturan Pembangkit Listrik[1]

Terdapat dua sistem kontrol utama pada pembangkit listrik yaitu pengaturan penggerak utama serta pengaturan arus medan. Frekuensi tegangan terbangkit tergantung pada kecepatan putar generator. Seperti terlihat pada persamaan 1.

$$f = \frac{n.p}{120} \quad (1)$$

Dimana:

f = frekuensi tegangan terbangkit(Hertz)

n = Kecepatan putar generator (RPM)

p = Jumlah pole

Tegangan terbangkit tergantung pada kecepatan putar generator dan arus medan pada rotor. Seperti terlihat pada persamaan 2.

$$E = c.n\phi \quad (2)$$

Dimana:

E = Tegangan terbangkit (Volt)

n = Kecepatan putar generator (RPM)

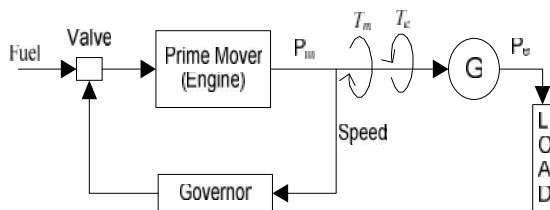
ϕ = Fluks medan(Wb)

c = Konstanta generator

Tujuan utama dari pengaturan sistem pembangkit adalah untuk menyeimbangkan daya keluaran generator dengan beban listrik dan rugi-rugi. Oleh karena itu, frekuensi tegangan terbangkit dan tegangan terbangkit harus dijaga pada nilai tetap dengan kondisi beban berubah.

B. Persamaan Gerak Generator[1]

Pada sistem pembangkit listrik, terdapat dua torsi yang mempengaruhi gerak generator. Kedua torka tersebut adalah torka mekanik dan torka elektromagnetik. Torsi mekanik dihasilkan oleh penggerak utama sedangkan torka elektromagnetik diakibatkan oleh keberadaan beban yang tersambung dengan terminal tegangan generator. Skema konsep pengaturan kecepatan pada sebuah unit pembangkit ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Skema Pengaturan Kecepatan Generator[1]

Kedua torka tersebut mengakibatkan percepatan generator. Hal ini ditunjukkan pada persamaan 3.

$$T_a = T_m - T_e \quad (3)$$

Dimana

T_a = Torsi akselerasi(N.m)

T_m = Torsi Mekanik (N.m)

T_e = Torsi elektromagnetik (N.m)

Dalam hal pengaturan frekuensi terhadap perubahan beban, dipilih perolehan hubungan antara daya mekanik dan daya listrik daripada torsi. Hubungan antara daya dengan torsi ditunjukkan oleh persamaan 4.

$$P = \omega_r T \quad (4)$$

Perubahan daya akan mengakibatkan perubahan kecepatan rotor dan torsi. Hal ini ditunjukkan oleh persamaan 5.

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T) \quad (5)$$

Dengan mengabaikan orde yang lebih tinggi, didapatkan persamaan 6.

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r \quad (6)$$

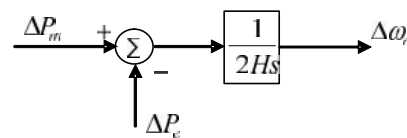
Hubungan perubahan daya elektromagnetik dan daya mekanik dengan memanfaatkan persamaan 6 ditunjukkan oleh persamaan 7.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0 (\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0}) \Delta\omega_r \quad (7)$$

Pada kondisi steady state, torsi elektromagnetik dan mekanik sama, dan kecepatan yang direpresentasikan dengan pu, $\omega_0 = 1$. Maka didapat persamaan 8.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (8)$$

Melalui persamaan 2.13 dapat digambarkan diagram blok yang menunjukkan perubahan daya dengan perubahan kecepatan pada Gambar 3.



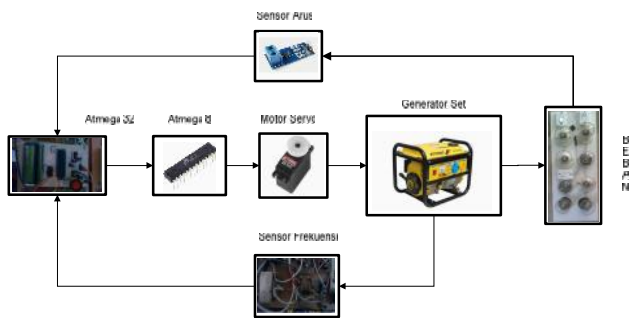
Gambar 3. Diagram Blok Hubungan daya dengan kecepatan[1]

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Arsitektur Sistem

Sistem terdiri dari generator set, rangkaian sensor frekuensi, sistem minimum mikrokontroller, sensor arus, dan motor servo. Rangkaian sensor frekuensi berfungsi untuk memberikan sinyal umpan balik. Sistem minimum mikrokontroller berfungsi untuk kontrol utama sistem dan pengiriman data, sensor arus digunakan untuk sinyal umpan balik pada mekanisme *tuning* parameter PID, dan motor servo berfungsi untuk menggerakkan *throttle valve* pada karburator.

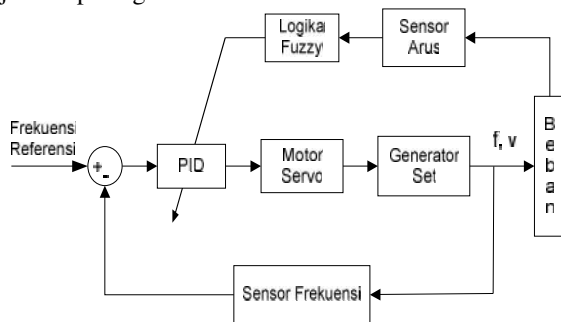
Nilai frekuensi hasil kalkulasi mikrokontroller dibandingkan dengan nilai *setpoint*. Perbandingan ini berupa selisih yang akan menjadi sinyal error $e(t)$ untuk diolah oleh controller PID-fuzzy yang tertanam pada mikrokontroller ATMEGA 32. Controller PID digunakan untuk memberikan sinyal kontrol ke aktuator sesuai dengan sinyal error. Fuzzy digunakan sebagai mekanisme penalaan parameter controller PID menyesuaikan dengan beban yang diberikan pada generator set. Mikrokontroller memberikan sinyal kontrol pada motor servo berupa sinyal PWM. Motor servo menggerakkan *throttle valve* pada karburator yang akan mempengaruhi kecepatan putar *prime-mover*. Arsitektur sistem ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Arsitektur Sistem

B. Blok Diagram Sistem

Pada penelitian ini frekuensi tegangan terbangkit dijaga tetap pada nilai 60 Hz. Dengan menggunakan controller PID. Parameter controller PID berubah sesuai dengan masukan sensor frekuensi pada sistem fuzzy. Sistem fuzzy berfungsi untuk mengubah parameter PID sesuai dengan jumlah beban yang diberikan pada generator set. Jumlah arus pada beban menandakan beban listrik yang dihubungkan dengan generator set. Blok diagram sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Diagram Blok Sistem

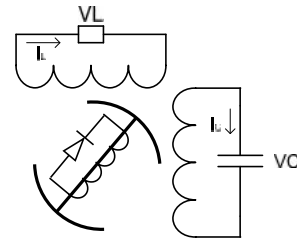
Aktuator pada generator set berupa motor servo yang terhubung dengan karburator generator set. Karburator berfungsi untuk mengatur jumlah campuran bensin dan udara pada silinder mesin. Jumlah campuran bahan bakar dan udara tersebut mempengaruhi putaran mesin yang mempengaruhi frekuensi tegangan terbangkit.

Jumlah beban yang diberikan akan mempengaruhi kecepatan putar generator sehingga diperlukan mekanisme pengaturan kecepatan putar Generator untuk mempertahankan frekuensi tegangan terbangkit.

C. Generator Set[2]

Generator Set memiliki penggerak utama berupa mesin bensin 4-langkah. Mesin bensin tersebut menggunakan sistem bahan bakar karburator. Berikut spesifikasi Generator set yang digunakan

- Kapasitas Daya Maksimum : 1000 VA
- Tegangan rata-rata : 220 Volt
- Frekuensi rata-rata : 60 Hz
- Fasa : 1 Fasa
- Jumlah pole : 2 pole
- Kecepatan rata-rata : 3000 RPM



Gambar 6. Skema Konstruksi Generator Sinkron Eksitasi Kapasitor[2]

Jenis generator yaitu generator dengan sistem eksitasi kapasitor. Skema konstruksi generaor sistem eksitasi kapasitor ditunjukkan oleh gambar 6. Generator ini memiliki karakteristik tegangan output bergantung kepada kecepatan generator. Tegangan generator bergantung pula pada jumlah arus yang ada pada beban pada kondisi frekuensi dijaga tetap[7]. Setelah dilakukan tes tegangan output terhadap frekuensi generator. Didapatkan bahwa generator set menghasilkan tegangan 220 volt pada frekuensi 60 Hz. Oleh karena itu ditentukan nilai referensi frekuensi tegangan terbangkit sebesar 60 Hz.

D. Identifikasi Sistem[3]

Identifikasi dinamis plant dilakukan dengan memberikan *set point* yang berubah terhadap waktu. Sinyal PRBS yang diberikan pada sistem terdiri atas sepuluh bit bilangan biner. Respon yang diberikan sistem dapat digunakan sebagai acuan dalam pemodelan *plant*. Sinyal PRBS merepresentasikan variasi bukaan throttle valve dalam derajat dengan frekuensi tegangan output. Identifikasi dilakukan pada tiga kondisi beban yaitu pada kondisi beban minimal, nominal dan maksimal. Beban yang diberikan pada generator set berupa lampu pijar 100 Watt dengan jumlah total 6 buah. Beban minimal 2 buah lampu, nominal 4 buah lampu, dan maksimal 6 buah lampu.

Proses pemodelan respon hasil identifikasi dinamis terdiri atas tiga tahap, yaitu:

1. Perhitungan parameter parameter ARX dengan metode *standard least square*
2. Melakukan Transformasi-Z terhadap pemodelan ARX, dengan waktu sampling 0,2 detik dan dengan metode *zero-order hold*
3. Melakukan transformasi terhadap hasil transformasi Z pada poin 2 ke dalam domain-S hingga diperoleh fungsi alih sistem.

Pengambilan data pada tiap-tiap beban yang diberikan dilakukan sebanyak lima kali. Dari kelima data tersebut didapatkan model matematika dengan nilai RMSE terkecil. Transfer function yang didapatkan pada tiap-tiap beban ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Transfer function derajat bukaan *throttle* dengan frekuensi Tegangan terbangkit Generator set

Beban	Transfer Function
Minimal(200 Watt)	$G(s) = \frac{0,8463s + 2,017}{s^2 + 2,366s + 0,2736}$

Nominal(400 Watt)	$G(s) = \frac{0,9964s + 4,918}{s^2 + 2,339s + 0,912}$
Maksimal(600 Watt)	$G(s) = \frac{0,7806s + 1,871}{s^2 + 2,531s + 0,3553}$

E. Perancangan Kontroller PID[4]

Perancangan kontroller PID dilakukan secara analitik. Pencarian parameter kontroller K_p , τ_i , dan τ_d disesuaikan dengan model plant. Parameter kontroller PID yang telah didapatkan dipergunakan sebagai batasan dalam perancangan mekanisme penalaan parameter PID.

Respon sistem yang diinginkan pada tiap kondisi beban adalah respon orde satu dengan *time constant* (τ) = 1 s.

1. Perancangan kontroller PID untuk beban minimal

a. Parameter Plant pada beban minimal

Parameter Plant	Nilai
K	7,372
τ	0,419
ω_n	0,523
ξ	2,261

b. Parameter kontroller PID Modifikasi

Parameter	Nilai
K_p	1,092
τ_i	8,049
τ_d	0,419
N	1,169

2. Perancangan kontroller PID untuk beban nominal

a. Parameter Plant pada beban minimal

Parameter Plant	Nilai
K	5,392
τ	0,202
ω_n	0,9552
ξ	1,382

b. Parameter kontroller PID Modifikasi

Parameter	Nilai
K_p	0,499
τ_i	2,692
τ_d	0,202
N	0,946

3. Perancangan kontroller PID untuk beban maksimal

a. Parameter Plant pada beban minimal

Parameter Plant	Nilai
K	5,266
τ	0,417

ω_n	0,355
ξ	1,264

b. Parameter kontroller PID Modifikasi

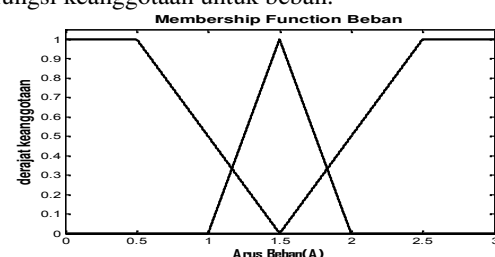
Parameter	Nilai
K_p	1,273
τ_i	6,706
τ_d	0,417
N	0,353

F. Perancangan Sistem Fuzzy[5]

Logika Fuzzy melakukan penalaan parameter PID dengan mengacu pada kondisi beban. Kondisi beban diketahui melalui arus yang mengalir pada beban. Apabila terjadi perubahan beban, arus yang mengalir pada beban juga akan berubah. Pada plant generator set, dengan beban yang berubah-ubah akan terjadi perubahan model matematika plant sesuai dengan hasil identifikasi. Oleh karena itu untuk mendapatkan respon dengan spesifikasi seperti yang diinginkan dengan $\tau = 1s$ diperlukan mekanisme penalaan parameter PID. Parameter kontroller PID yang diatur oleh logika fuzzy diantaranya K_p , τ_i , N dan τ_d . Pembentukan Fungsi keanggotaan masukan dan keluaran didasarkan pada parameter PID yang telah didapatkan untuk kondisi beban minimal, nominal, dan maksimal. Perancangan dilakukan pada fungsi keanggotaan masukan, fungsi keanggotaan keluaran dan *rule-base*.

1. Fungsi Keanggotaan Masukan

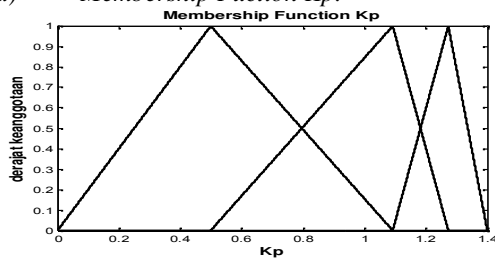
Masukan logika fuzzy dibatasi hanya pada jumlah beban saja karena beban yang digunakan pada sistem menggunakan sistem switching yang berarti tidak terjadi perubahan beban secara kontinyu. Berikut fungsi keanggotaan untuk beban.



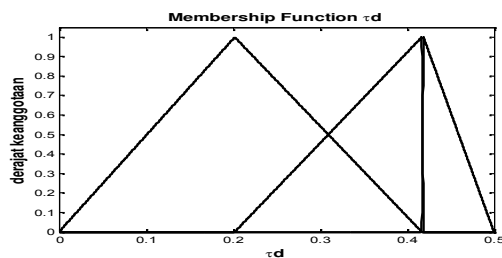
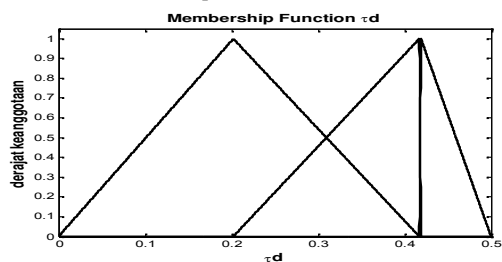
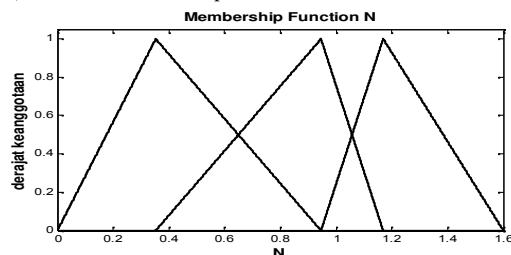
Gambar 6. Membership Function Beban

2. Fungsi keanggotaan Keluaran

Keluaran dari sistem fuzzy berupa nilai untuk penalaan parameter K_p , τ_i , N dan τ_d . perancangan fungsi keanggotaan keluaran sistem fuzzy didasarkan pada hasil perancangan kontroller PID pada kondisi beban minimal, nominal dan maksimal. Terdapat tiga nilai linguistik pada tiap-tiap fungsi keanggotaan yaitu kecil, sedang, dan besar.

(a) *Membership Fuction Kp:*

Gambar 7. Membership Function Kp

(b) *Membership Function τ_i :*Gambar 8. Membership Function τ_i (c) *Membership Function τ_d :*Gambar 9. Membership Function τ_d (d) *Membership Function N:*

Gambar 10 . Membership Function N

3. Rule Base

Pada penelitian ini, terdapat empat rule base untuk penalaan parameter K_p , τ_i , N dan τ_d . Pada masing-masing Rule base, digunakan pada penelitian ini terdiri dari 3 rule base untuk tiga nilai linguistik.

Tabel 2: Rule Base

Beban \ PID	Minimal	Nominal	Maksimal
K_p	Sedang	Kecil	Besar
τ_i	Besar	Kecil	Sedang
τ_d	Besar	Sedang	Kecil
N	Besar	Kecil	Sedang

IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

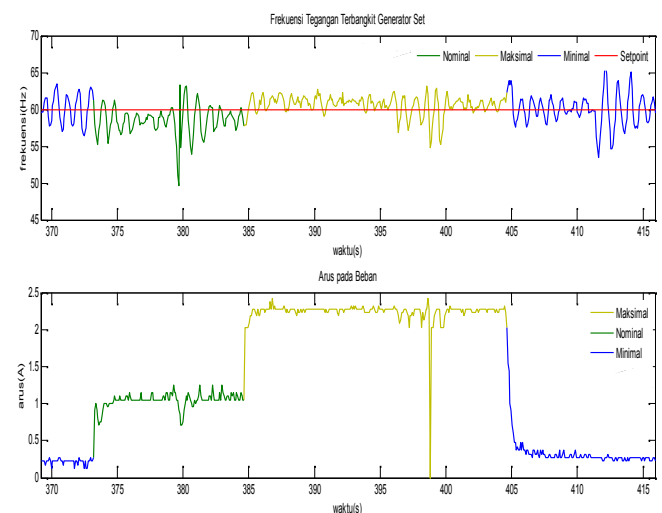
A. Uji Kontroller PID-Fuzzy parameter tetap dengan Beban Berubah

Pada bagian ini dilakukan pengujian perubahan beban. Melalui pengujian ini dapat diketahui kemampuan kontroller PID-fuzzy terhadap pengurangan beban dan penambahan beban dengan jumlah tertentu. Pembebanan dilakukan pada kondisi steady-state. Pada bagian ini ditunjukkan respon dari frekuensi tegangan terbangkit generator set terhadap perubahan beban, arus beban untuk menunjukkan perubahan beban dan parameter PID untuk menunjukkan perubahan parameter PID terhadap perubahan beban.

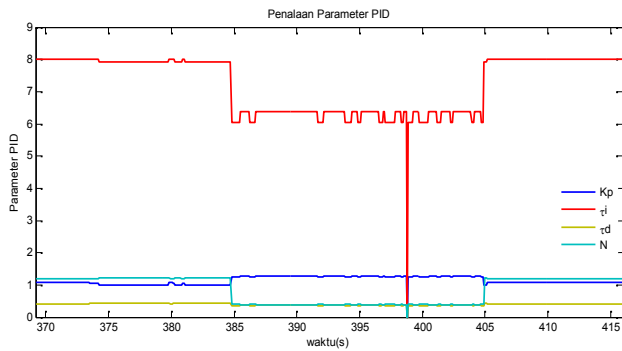
Pada Gambar 11 dan 13 terlihat perubahan beban dari kondisi minimal, nominal, maksimal dan kembali lagi ke minimal. Pada saat terjadi perubahan beban, frekuensi mengimbangi perubahan frekuensi tersebut. Akan tetapi, respon dari frekuensi tegangan terbangkit terlihat sering berosilasi.

Pada gambar 12 dan terlihat penalaan parameter PID sesuai dengan arus pada beban. Dengan adanya penalaan parameter PID, respon sistem terhadap pembebanan lebih cepat namun terjadi osilasi yang cukup sering.

Respon dari frekuensi tegangan terbangkit generator set dapat mengikuti set-point ketika pembebanan. Ketika terjadi penurunan beban, terjadi peningkatan frekuensi dan dapat diatasi dengan cepat oleh sistem. Akan tetapi, terjadi osilasi di sekitar *set-point*. Selain dikarenakan respon kontroler yang terlalu besar, osilasi juga disebabkan oleh adanya gangguan dari sistem sendiri. Sehingga saat respon sistem menuju set-point terjadi osilasi kembali untuk mengatasi gangguan yang terjadi.



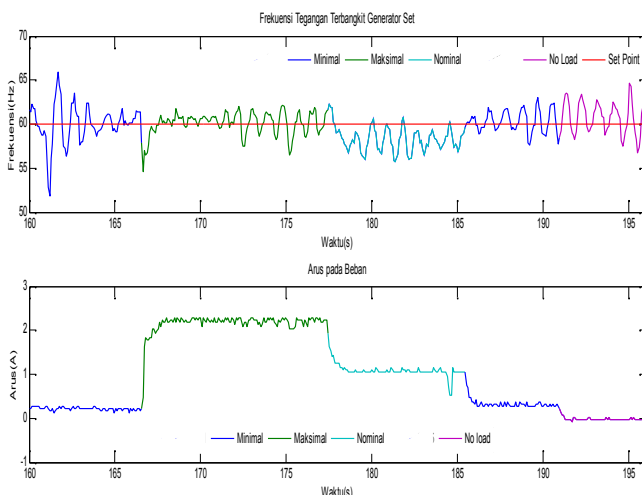
Gambar 11 Respon dari Frekuensi Tegangan Terbangkit terhadap perubahan beban



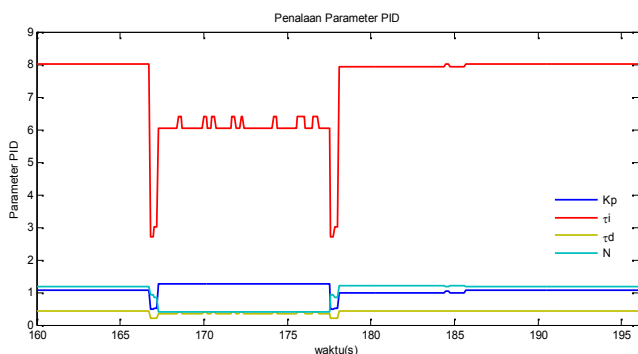
Gambar 12. Penalaan Parameter PID

Secara umum kontroler PID-fuzzy dapat dengan cepat mengatasi perubahan frekuensi akibat perubahan beban. Seperti terlihat pada tabel 3, waktu naik rata-rata dari frekuensi tegangan terbangkit generator yaitu 1.11 sekon. Perubahan frekuensi rata-rata yaitu 5.37 %. Respon dari frekuensi tegangan terbangkit generator sering juga mengalami osilasi.

Perubahan frekuensi dipengaruhi oleh jumlah perubahan beban. Seperti terlihat pada tabel 3, pada saat terjadi perubahan beban dari minimal dan maksimal, terjadi perubahan frekuensi hingga 8.39%. Dengan perubahan beban yang lebih kecil yaitu Nominal ke minimal terjadi perubahan frekuensi 1.4%.



Gambar 13. Respon dari Frekuensi Tegangan Terbangkit terhadap perubahan beban



Gambar 12. Penalaan Parameter PID

Tabel 3 Pengujian kontroler PID-fuzzy dengan Beban Berubah

Perubahan Beban	Perubahan frekuensi(%)	Waktu Naik(tr)
Minimal-Maksimal	8.39	0.8
Maksimal-Nominal	3.75	0.4
Nominal-Minimal	1.4	0.7
Minimal-No Load	5.88	1.3
Minimal-Nominal	7.95	0.6
Nominal-Maksimal	3.78	3.4
Maksimal-Minimal	6.43	0.6

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dalam penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa genset akan mengalami perubahan frekuensi pada saat terjadi perubahan beban. Kontroler dapat mengatasi perubahan frekuensi ini dengan mengendalikan bukaan throttle sesuai dengan beban yang terhubung dengan generator set. Melalui pengujian kontroler PID-fuzzy didapatkan bahwa respon dari frekuensi tegangan terbangkit sering mengalami osilasi. Rata-rata %MP saat terjadi pembebanan 6.66%. Kontroler PID-fuzzy dapat dengan cepat mengatasi perubahan frekuensi saat terjadi pembebanan dengan waktu kembali ke *setpoint*(tr) rata-rata 0.5 detik. Perubahan frekuensi rata-rata saat terjadi pembebanan yaitu 5.37 %. Besarnya nilai %MP dipengaruhi oleh jumlah perubahan beban.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada orang tua penulis yang selalu memberikan doa serta dukungan tulus tiada henti, Bapak Dr. Ir. Moch Rameli dan Bapak Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T., atas segala bimbingan ilmu, moral, dan spiritual dari awal hingga terselesaikannya penelitian ini. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada angkatan e-48, Seluruh mahasiswa bidang studi sistem pengaturan, Himatekro ITS, dan semua pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kundur P., *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, USA, (1994).
- [2] Kubo, *Internal Combustion Engine Driven Generator*, United States Patent No. 4296368, Japan, (1981).
- [3] Ljung L., Glad T., *Modelling of Dynamic Systems*, Prentice Hall, USA, (1994).
- [4] Ogata, K., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, USA, (2002).
- [5] Passino, M., Yurkovich, S., *Fuzzy Control*, Addison Wesley Longman, USA, (1998).